

論文の内容の要旨

論文題目	A study of analyzing end-plate and conducting waves using multi-channel surface EMG
学位 申請者	Marzieh Aliabadi Farahani

人体の骨格に繋がる骨格筋は、筋肉の長さ方向に走る多数の筋線維で構成され、脳または脊髄から運動神経を通して興奮が伝わり、収縮する。運動神経が筋線維を興奮させる部位は、神経筋接合部（終板）と呼ばれ、化学的なシナプスで構成される。この終板において、筋線維の活動電位が発生し、活動電位が両側の腱方向に伝播することで、筋線維の収縮が起こる。筋電図は、筋線維の活動電位を記録、評価する技術であり、筋電図の測定には、2つの方法（筋内筋電図、表面筋電図）がある。筋内筋電図では、患者を傷つけ、多くのストレスを与える針電極が用いられる。一方、表面筋電図は、筋肉に間接的に接触し、痛みを与えないので、筋内筋電図よりも頻繁に使用されている。

多チャンネル表面筋電図は、一列に並んだ複数電極を用いて、複数チャンネルの活動電位を測定する。この多チャンネル表面筋電図を用いて、筋線維伝播速度を求める研究が多く存在する。筋線維伝播速度は、筋線維に沿った活動電位の伝播速度で、以前の研究では、ゼロ交差法や相互相関法などの様々な方法で求められていた。しかし、2チャンネル間のみの活動電位の伝播速度や、解析単位ごとに単一の伝播速度だけが求められていた。一方、筋肉には様々な伝播速度を持つ運動単位が多数存在すると考えられ、多様な伝播速度が多チャンネル表面筋電図から取得されると考えられる。

本論文で用いた多チャンネル表面筋電図解析方法は、多様な伝播波の特性を個別に調べ、それらを定量化する機能を備えている。従って、多数の運動単位から得られる多様な伝播波を総合的に解析できる。しかし、両側の腱方向に伝播する対称伝播波対の特性は、以前の研究では明らかにされていなかった。さらに、終板付近で伝播する波形の特性は詳細に解明されておらず、対称伝播波対に関する終板の影響は明確ではなかった。従って、筋収縮の詳細なメカニズムを理解するためには、対称伝播波対に関する終板の影響を解明する必要がある。

一方、利き腕と非利き腕に関する研究では、積分筋電図を使用し、その振幅だけの考察のみで、多チャンネル表面筋電図を用いた研究はなかった。また、筋収縮の繰り返し頻度で伝播波特性が変化することが解明されている。従って、使用頻度の異なる利き腕と非利き腕の上腕二頭筋の伝播波を多チャンネル表面筋電図で比較することにより、両腕の上腕二頭筋の筋組成と筋運動制御方法の違いを考察することが可能と考えられる。

以上のことから、本研究の第一の目的は、対称伝播波対の特性を調べ、終板付近で伝播する波形の特性を解明し、対称伝播波対における終板の影響を明らかにすることである。また、本研究の第二の目的は、異なる負荷を与え、多チャンネル表面筋電図を使用することで、使用頻度の異なる利き腕と非利き腕の筋組成の違いと、脊髄優位か皮質優位かの観点で筋運動制御方法を考察することである。

本論文は全8章で構成され、各章の要旨は以下の通りである。

第1章では、表面筋電図の先行研究と問題点を挙げ、多チャンネル表面筋電図の伝播波特性を個別に調べる意義を述べ、本研究の目的を記述した。

第2章では、身体運動の仕組みについて記述した。運動は自発的および不随意のふたつのグループに分けられ、筋肉は屈筋と伸筋のペアで機能する。さらに、リハビリテーションの意味とその目標について記述した。リハビリテーションでは、患者を傷つけず、患者に多くのストレスを与えない多チャンネル表面筋電図を用いて、筋収縮メカニズムと筋運動制御方法を知ることが重要であることを記述した。

第3章では、人体の筋肉の種類、構造、機能について記述した。筋肉は、平滑筋、骨格筋、心筋の3つのカテゴリーに大別され、その中で骨格筋は、数千の筋線維で構成され、筋線維はその収縮速度で大きく分類され、その伝播速度について記述した。また、神経筋接合部である終板は、運動神経の軸索終末と筋線維の化学的なシナプス結合であることを記述した。

第4章では、この研究で使用した解析手法を記述した。使用した解析手法は、1)多チャンネル伝播波検出法、2)対称伝播波対検出法、3)伝播波発生源検出法の3種類である。それぞれの手法は伝播波判定に用いる波形条件を変えている。これら3つの方法を適用することにより、終板位置の推定及び終板付近での筋電位の解析が行われた。

第5章では、この研究の最初の実験方法とその結果を記述した。実験では、MVC40%の負荷で1分間、右手の肘を90度の角度に保つように指示した。伝播波の振幅、伝播速度、空間波長とそれらの経時的な変化、及び対称伝播波対の特性を調べた。また、終板付近での伝播波形成過程の特性も明らかにした。以上の解析結果から、終板位置の推定方法に関して考察した。また、終板の分布状況に関しても考察した。

第6章では、この研究の2番目の実験方法とその結果を記述した。実験では、利き腕と非利き腕に対して、2つの異なる条件(40%MVCで10秒間と10%MVCで30秒間)において、右手の肘を90度の角度に保つように指示した。伝播波の振幅、伝播速度、空間波長とそれらの経時的な変化を調べた。その結果から、使用頻度の異なる利き腕と非利き腕に対する筋組成の違いと、脊髄優位か皮質優位かの観点で筋運動制御方法を考察した。

第7章、第8章では、上記の研究で得られた結果をまとめ、研究の成果を総括評価した。また、今後の課題や展望についても記述した。

論文審査の結果の要旨

学位申請者氏名 Marzieh Aliabadi Farahani

審査委員主査 板倉 直明

委員 内海 彰

委員 山田 哲男

委員 水戸 和幸

委員 水野 統太

本論文は、『A study of analyzing end-plate and conducting waves using multi-channel surface EMG』と題して以下に示す全8章から構成されている。

第1章『Introduction』では、本論文の研究背景、目的を記述している。研究背景では、身体運動のリハビリテーションにおいて、骨格筋の収縮メカニズムを理解することが重要で、筋電図から詳細に骨格筋の収縮メカニズムを解析するために、多チャンネル表面筋電図を積極的に用いる必要性を記述している。さらに本論文の目的が、1)多チャンネル表面筋電図で観測される終板から対称的に伝播する対称伝播波対を解析し、その発生メカニズムと終板の分布状況を考察することと、2)使用頻度の異なる利き腕と非利き腕の上腕二頭筋に関して多チャンネル表面筋電図から得られる伝播波を解析し、上腕二頭筋における筋組成の違いや、脊髓優位か皮質優位かの観点で筋運動制御方法を考察することの2点であることを明確に記述している。

第2章『Rehabilitation and it's goals』では、まず身体運動の仕組みについて記述している。運動は自発的および不随意のふたつのグループに分けられ、筋肉は屈筋と伸筋のペアで機能する。さらに、リハビリテーションの意味とその目標について、患者を傷つけず、多くのストレスを与えない多チャンネル表面筋電図を用いて、筋収縮メカニズムと筋運動制御方法を知ることが重要であることを記述している。

第3章『Skeletal muscle of human body』では、人体の筋肉の種類、構造、機能について記述している。筋肉は、平滑筋、骨格筋、心筋の3つのカテゴリーに大別され、その中で骨格筋は、数千の筋線維で構成され、筋線維はその収縮速度で大きく分類され、その伝播速度について記述している。また、神経筋接合部である終板は、運動神経の軸索終末と筋線維の化学的なシナプス結合であることも記述している。

第4章『Methods』では、研究で使った解析手法を記述している。使った解析手法は、1)多チャンネル伝播波検出法、2)対称伝播波対検出法、3)伝播波発生源検出法の3種類で、それぞれの手法は伝播波判定に用いる波形条件を変えている。これら3つの手法を適用することで、終板位置の推定及び終板付近での筋電位の解析と考察を行うことを記述している。

第5章『Experiment 1 and results』では、この研究の最初の実験方法とその結果を記述している。実験では、MVC40%の負荷で1分間、右手の肘を90度の角度に保つように指示し、伝播波の振幅、伝播速度、空間波長とそれらの経時的な変化、及び対称伝播波対の特性を調べている。また、終板付近での伝播波形成過程の特性も調べている。その結果から、対称伝播波対について、近位方向に比べて遠位方向では伝播波パラメータの多様性が増大していることを明らかにしている。生理学的知見では、同じ特性の伝播波が対称的に伝播すると考えられていたが、遠位方向にある終板の拡がりや遠位方向への伝播波に影響を与えているものと考察している。また、振幅が単調に増加して伝播波を形成する割合が遠位方向で少ないことから、遠位方向にある終板の拡がりを推測している。さらに、対称伝播波対が収縮開始直後に全く観測されない現象がすべての被験者で得られたことから、対称伝播波対の存在の有無が、筋運動制御方法の違いを推測できる可能性も考察している。

第6章『Experiment 2 and results』では、この研究の2番目の実験方法とその結果を記述している。実験では、利き腕と非利き腕に対して、2つの異なる条件（40%MVCで10秒間と10%MVCで30秒間）において、右手の肘を90度の角度に保つように指示し、伝播波の振幅、伝播速度、空間波長とそれらの経時的な変化を調べている。その結果から、利き腕の方が非利き腕に対して、単純な伝播波分布を示すと同時に経時的にも収縮中は常に平均的に単純な伝播波が得られる結果を明らかにしており、脊髄優位な筋運動制御方法では、伝播波が同一化するものと考察している。伝播波が同一化する現象は、筋運動訓練の際にも観測されたことから、伝播波を観測することで、リハビリテーションによる効果を客観的に推測できる可能性を示している。

第7章『Conclusion』、第8章『Future work』では、本研究で得られた結果を整理し、研究の成果を評価している。また、今後の研究の課題や展望についても記述している。本研究の成果として、終板の分布が対称伝播波対に影響を与えることや、対称伝播波対の存在の有無が筋肉の制御方法を考察できる可能性があることを記述している。また、使用頻度の異なる利き腕と非利き腕の伝播波を比較することで、伝播波パラメータの分布から、筋組成の違いだけでなく、脊髄優位か皮質優位かの観点で筋運動制御方法を考察できる可能性を明確に記述している。

このように、本論文では多チャンネル表面筋電図から得られる伝播波を解析することによって、終板の分布や筋組成及び筋運動制御方法を推測できることを示し、リハビリテーション効果の検証などへの応用に使える可能性があることから、表面筋電図測定の実用化に寄与できる優れた研究であると評価できる。

以上により、本論文は博士（工学）の学位論文として十分な価値を有するものと認める。